

文章编号:1673-9469(2020)02-0030-08

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2020.02.006

土体不排水抗剪强度非平稳性对深基础极限承载力影响的可靠度分析

周旭辉¹,李睿²,吴勇信^{1*}

(1. 河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210024;2. 中国电建集团 华东勘测设计研究院有限公司,浙江 杭州 311122)

摘要: 目前有关抗剪强度参数随深度变化的随机场对深基础地基稳定性的影响研究还不深入。为此,建立了土体不排水抗剪强度均值和标准差随深度有不同程度线性增加的非平稳随机场模型,此外,还建立了与非平稳随机场对应的不排水抗剪强度均值与其相同的平稳随机场模型。探讨了不同非平稳程度的随机场对深基础地基承载力及其失效概率的影响规律,比较了各个非平稳随机场地基模型与其对应的平稳随机场地基模型的地基承载力的差异性。结果表明:当考虑不排水抗剪强度的非平稳性时,地基承载力均值和差异性随非平稳程度的提高而线性增加。基础埋深越大,地基承载力均值随非平稳程度提高而增加的趋势也越大。在相同的安全系数水平下($FS>1$),地基失效概率随着非平稳程度的提高而增大。对深基础而言,在相同的安全水平下($FS>1$),平稳随机模型会低估具有非平稳性的地基的失效概率,且非平稳程度越高,估计误差也越大。

关键词: 地基稳定性;非平稳性;随机场;不排水抗剪强度;地基失效概率

中图分类号:TU 473

文献标识码:A

Reliability Analysis of Ultimate Bearing Capacity of Buried Footings Considering Non-stationary of Undrained Shear Strength

ZHOU Xuhui¹, LI Rui², WU Yongxin^{1*}

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China;
2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou, Zhejiang 311122, China)

Abstract: The impact of the variation of shear strength parameters of soil with depth on the stability of buried foundations has not been thoroughly studied yet. A non-stationary random field model in which the mean and standard deviation of undrained shear strength of soil increase linearly with depth with different degrees was established. In addition, the stationary random field with the same mean of undrained shear strength as the corresponding non-stationary random field was established. The influence of non-stationary random fields with different degrees on the bearing capacity of buried foundations and the failure probability of buried foundations were discussed. The difference of bearing capacity associated with non-stationary random field and its corresponding stationary random field was compared. The results show that when considering the non-stationary of undrained shear strength, the mean value and the difference of bearing capacity of buried footings increase linearly with the degree of non-stationary. The deeper the foundation depth is buried, the more the average bearing capacity increases with the increase of non-stationary degree. Under the same safety factor level ($FS > 1$), the failure probability of the foundation increases with the increase of non-stationary degree. For the buried foundation, at the same level of safety ($FS > 1$), the stationary stochastic field model underestimates the failure probability of a non-stationary field, and the higher the non-stationary state, the larger the estimation error.

收稿日期:2019-12-05

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41630638)

作者简介:周旭辉(1994-),女,江苏南京人,硕士,主要从事岩土工程可靠度与风险分析的研究。

* 通讯作者:吴勇信(1985-),男,江苏射阳人,博士,教授,主要从事岩土地震工程与工程可靠度领域的研究。

Key words: foundation stability; non-stationary; random field; undrained shear strength; failure probability

浅基础的地基承载力是一个典型的工程问题。目前国内外已经有诸多学者对浅基础的地基承载力进行了研究^[1-3]。然而,深基础在岩土工程尤其是近海工程中也有着广泛的应用,特别是在软粘土海床土壤中,离岸的基础可能会深深嵌入土壤中^[4]。现实情况中,由于不同埋深处的土体往往会经历不同的地质、环境和物理化学作用,因此土体参数呈现出一定的空间变异性。目前,诸多学者已将土体参数的空间变异性引入到边坡^[5]、隧道^[6]等工程中。此外,土体的沉积也会导致土体参数在竖直方向呈现出沿深度变化的趋势,通常将这种土体参数在深度方向的非平稳性趋势称为非平稳性。有大量实测数据表明土体的不排水抗剪强度参数有随深度线性增加的趋势^[7-9]。因此,非平稳随机场模型与实际情况更为接近。关于深基础的地基承载力,大部分已有的研究主要是基于土体强度参数随深度线性增加的均质土体地基^[10]或平稳随机场模型^[11]展开的。祁小辉等^[1]曾指出土体不排水抗剪强度的平稳随机场会使对浅基础地基失效概率的估计产生偏差。针对基于非平稳随机场的深基础地基承载力的研究较少见报道。

本文探讨了不排水抗剪强度参数的非平稳性对深基础地基承载力的影响。因此,本文在考虑了不排水剪切强度空间变异性的基础上,建立了不排水抗剪强度均值和标准差随深度线性增加的非平稳随机场模型,并与非线性有限元分析结合,探讨了基于非平稳随机场的深基础地基承载力的统计规律。本研究选用的土体参数随机场与实际情况更接近,可准确反映深基础地基承载力。

1 非平稳随机场的模拟方法

本文所涉及的非平稳随机场是不排水抗剪强度均值和标准差随深度线性增加的非平稳随机场,由图 1 可知非平稳随机场的不排水抗剪强度参数的空间分布规律,可以通过以下步骤生成均值和标准差随深度线性增加的非平稳随机场的不排水抗剪强度参数。

第一步:本研究采用谱表现法^[12]展开离散不排水抗剪强度均值 $\mu_s = 10.0$ kPa,标准差为 $\sigma_s = 3.0$ kPa,波动范围 $\theta_h = 50.7$ m, $\theta_v = 3.8$ m,符合 Lognormal 分布的初始平稳随机场。将初始不排水抗

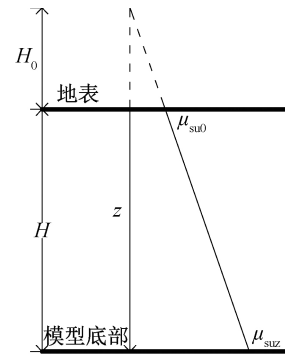


图 1 均值随深度线性增加的非平稳随机场
Fig.1 Non-stationary random field with linearly increasing mean strength

剪强度参数 s_{0i} 赋予到每一个模型单元, $i = 1, 2, \dots, n$, 表示第 i 个单元。

第二步:根据单元埋深 z ,用公式(3) (可由公式(1)和(2)推导得到)的调整系数对每个单元的不排水抗剪强度参数进行调整,得到均值和标准差随深度线性增加的非平稳随机场的不排水抗剪强度 s_{zi} :

$$M = \frac{\mu_{suH} - \mu_{su0}}{\mu_{su0}} = \frac{(\mu_{suH} - \mu_{su0})/H}{\mu_{su0}/H} = \frac{H}{H_0} \quad (1)$$

$$\frac{s_{zi} - s_{0i}}{s_{0i}} = \frac{z}{H_0} \quad (2)$$

$$s_{zi} = s_{0i} \frac{H + M \cdot z}{H} \quad (3)$$

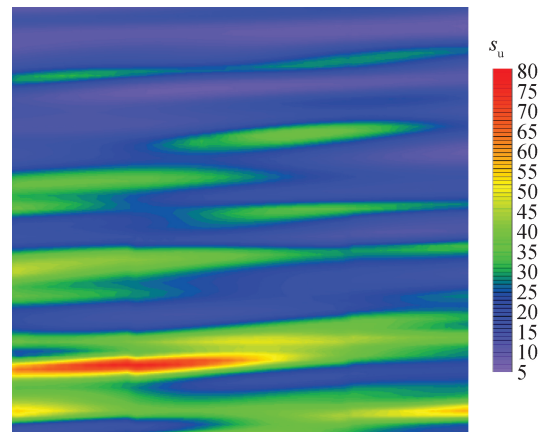


图 2 s_u 非平稳随机场的一次实现(单位:kPa)
Fig.2 A typical realization of non-stationary random field of undrained shear strength

其中, μ_{suH} 表示模型底部的不排水抗剪强度均值, μ_{su0} 表示地表不排水剪强度均值, z 表示单元中心点的埋置深度, H 表示模型的高度, M 表示衡量非平稳程度的无量纲量,由式(1)定义。

图2表示的是一次非平稳随机场的实现得到的不排水抗剪强度空间分布云图,图中颜色浅的部分表示低强度区域,颜色深的部分表示高强度区域。由图2可以看出不排水抗剪强度有明显的随深度线性增加的规律。

2 随机场的有限元模型

2.1 确定性分析

本文利用非线性有限元软件 ABAQUS 6.12 对二维平面应变条件下的地基承载力进行分析。本文选用了 Li 等^[13]文献中的算例,考虑埋深 D 位于地表下 $2B$ 的不排水黏土中的刚性基础(宽 B , 高 h),如图3所示。基础宽 $B=20$ m, 高 $h=4$ m, 基础埋深 $D=2B$, 基础为理想刚性体。土体和基础的接触面为完全约束的接触类型,这符合基础在不排水黏土中的力学行为。模型边界条件为左右两端固定 x 方向位移,底部固定所有方向位移,在基础底部节点上施加竖直向下的位移直至土体承载力稳定在破坏值(该位移值约为基础宽度的6%)。

如图3所示,土体模型宽 $6.4B$, 高 $6B$, 在本研究中,网格单元水平方向尺寸为 2.0 m, 竖直方向尺寸为 0.5 m, 这样既保证了计算精度,也避免了网格划分过多使计算量过大的问题。在条形基础附近 $3B \times 2B$ 范围内,网格被进一步划分为大小为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 的单元。

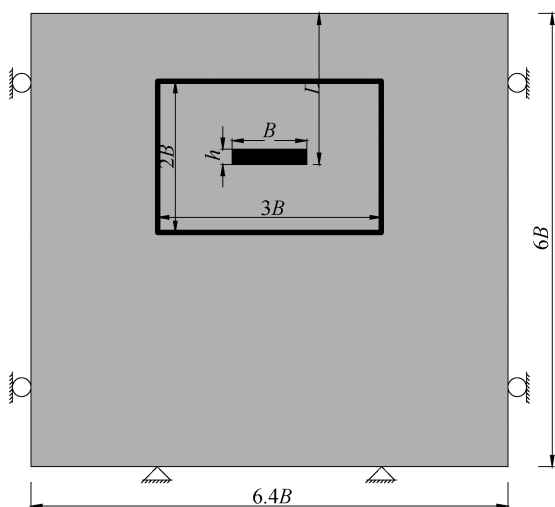


图3 深基础模型及其边界条件

Fig.3 Model and boundary conditions of a buried footing

选取一组参数进行确定性分析,该组参数为 Li 等^[13]文献中基础埋深为 $2B$ 时不排水抗剪强度参数为常量的情况,即 $s_u = \mu_s = 10.0$ kPa。粘土弹性模量 E 与不排水剪切强度 s_u 的关系始终满足

$E/s_u = 500$, 即 $E = 5$ MPa, 泊松比 $\nu = 0.49$, 服从摩尔-库伦屈服准则。

提取基础底部的承载力,对其进行无量纲化处理,得到无量纲地基承载力 N_c , 可表示为:

$$N_c = \frac{RF_i/B}{\mu_s} \quad (4)$$

其中, RF_i 为条形基础的地基承载力。利用该组数据得到的地基极限承载力为 2154.36 kN, 即 $N_c = 10.77$ 。这与 Li 等^[13]的结果 $N_c = 10.74$ 十分接近。这验证了本文计算地基承载力的模型的正确性。

此外,还选取了三组非平稳参数进行确定性分析,分别为 $M=1.0, M=2.0, M=3.0$ 时不排水抗剪强度参数随深度逐渐增加的三种情况,即相同埋深处的所有单元的 s_u 相等,且 s_u 随深度逐渐增加,这三种情况的确定性分析得出的地基极限承载力分别为 $2900.17, 3632.12, 4358.91$ kN。

2.2 不确定性分析

本文利用蒙特卡洛模拟研究考虑参数在竖直方向的非平稳性时深基础地基承载力均值、标准差和地基失效概率的变化规律。由第1节可知,土体参数的均值和标准差随深度不变的平稳随机场目前应用较多,而土体参数的非平稳性对土体的力学行为有较大的影响,因此有必要对土体参数非平稳性对地基承载力的影响进行研究。

首先考虑不排水抗剪强度均值和标准差随深度变化的非平稳随机场,分别取 $M=1.0, 2.0, 3.0$ 三种非平稳随机场情况。对于非平稳随机场的情况,为了比较不排水抗剪强度的非平稳程度对地基承载力的影响,地表的不排水强度均值 μ_{s_u0} 均为 10 kPa, 不排水抗剪强度的均值随深度的变化符合图1中的斜直线,即分别随深度线性增加至 $20, 30, 40$ kPa, s_u 的变异系数始终为 $COV = \sigma_s/\mu_s = 0.3$ 。同时,为了便于和 s_u 不随深度变化的情况作对比,考虑了 μ_s 随深度保持不变,即 $M=0$ 的平稳随机场情况。此外,为了便于和 s_u 随深度变化的工况作对比,还考虑 s_u 均值和标准差与非平稳随机场相同的平稳随机场,该平稳随机场的 μ_s 和 σ_s 分别取为非平稳随机场模型中部的 s_u 均值和标准差,即 $M=1.0, 2.0, 3.0$ 的非平稳随机场分别对应 $\mu_s = 15.0$ kPa, $\mu_s = 20.0$ kPa 和 $\mu_s = 25.0$ kPa 的平稳随机场。

3 计算结果与分析

3.1 深基础在随机地基中的破坏机制

在本文中,对有限元计算分析提取的基底

承载力进行处理后得到无量纲地基承载力 N_c , 即:

$$N_c = \frac{RF_i/B}{s_{u,z=0m}} = \frac{q_{fi}}{s_{u,z=0m}} \quad (5)$$

RF_i 为第 i 次模拟的地基承载力, B 为基础宽度, $B=20$ m, $s_{u,z=0m}$ 为地基表面 $z=0$ m 处的不排水剪切强度, $M=0.0, 1.0, 2.0, 3.0$ 四种随机场的 $s_{u,z=0m}$ 均值为 10 kPa。

在接下来的分析中, 1 000 次蒙特卡罗模拟的非平稳随机场的计算结果将与 1 000 次蒙特卡罗模拟的平稳随机场的计算结果进行对比, 以比较不同平稳程度的不排水抗剪强度对土体地基承载力的计算结果的影响程度。

图 4 给出了 1 000 次蒙特卡罗模拟中考虑不排水抗剪强度均值和标准差随深度变化的三次典型实现 ($M=1.0, 2.0, 3.0$), 以及不排水抗剪强度均值和标准差随深度不变时的一次典型实现 ($M=0.0$), 图中浅色区域表示不排水抗剪强度较低的区域, 深色表示不排水抗剪强度较高的区域。可以看出, 每一次蒙特卡罗模拟实现的非平稳随机

场模拟效果都呈现出不排水抗剪强度随深度增加的效果, 且对比 $M=0.0, 1.0, 2.0, 3.0$ 的不排水抗剪强度云图发现, 不排水抗剪强度随深度增加的趋势愈加明显。表明本文随机场模拟方法有效。

从 $M=0.0, 1.0, 2.0$ 和 3.0 的 1 000 组计算工况中各选取一组具有代表性的工况, 最大剪应变云图如图 5 所示。由图 5 可知, 相比于 $M=0.0$ 的地基剪切面, $M=3.0$ 时基础底部延伸出的土体剪切面数量更少, 分布位置在更浅层的区域。结合这两个工况的不排水抗剪强度云图来看, 当 $M=0.0$ 时, 剪切破坏面最深发展至破坏面 I 和破坏面 II 处, 但当 $M=3.0$ 时, 破坏面 I 和 II 对应位置处的地基中分布着不排水抗剪强度更高的土体, 限制破坏面发展至这些高不排水强度区域, 导致在非平稳随机场 ($M=3.0$) 地基中并未形成破坏面 I 和破坏面 II。因此, 非平稳随机场的深基础破坏面比平稳随机场破坏面分布在更浅层的土体区域的原因是非平稳随机场底部的高不排水强度土体限制了破坏面延伸至埋深的土体中。诸多学者的研究都佐证了这一规律的合理性^[13-14]。

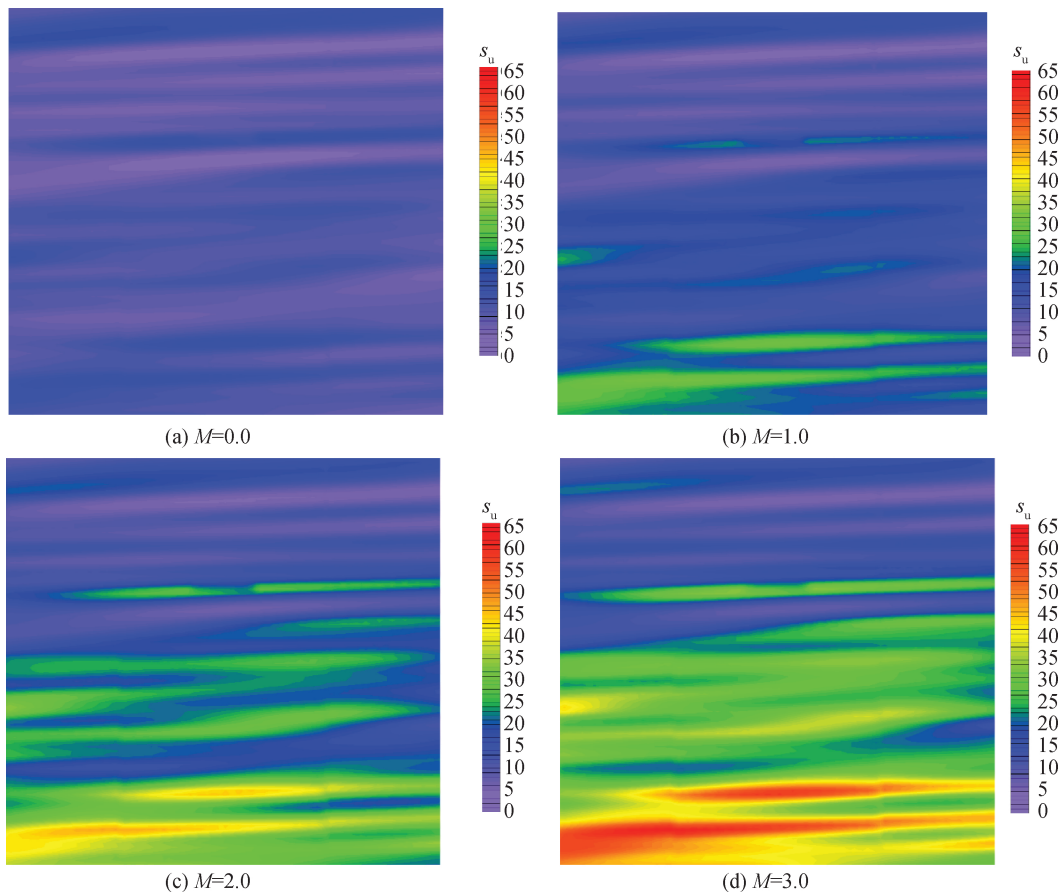


图 4 不同非平稳程度的 s_u 随机场的四次实现(单位:kPa)

Fig.4 Four typical realizations of different degrees of non-stationary random fields of undrained shear strength

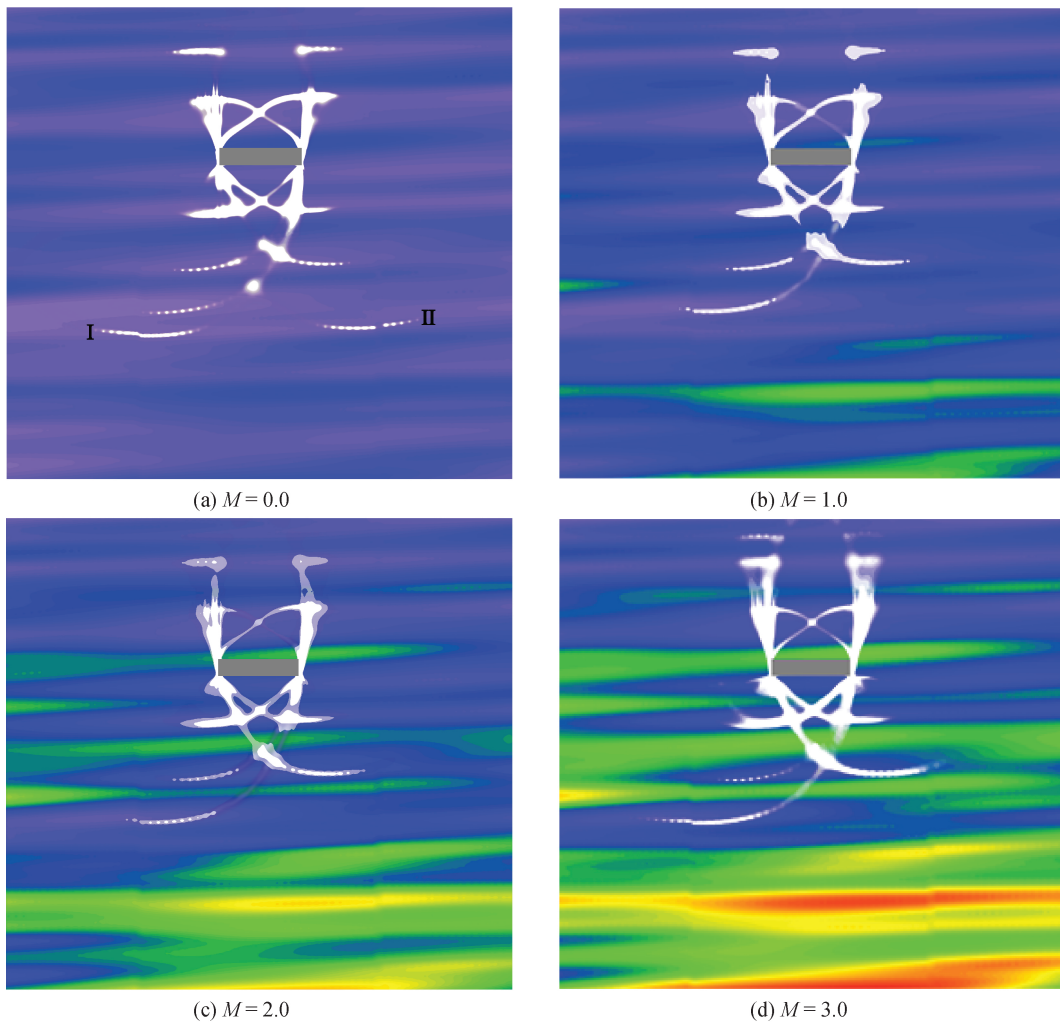


图5 不同非平稳程度的 s_u 随机场的剪切面分布

Fig.5 Different shear planes for different degrees of non-stationary random field of undrained shear strength

3.2 不同非平稳程度随机场的深基础地基承载力

基于蒙特卡洛模拟可由公式(4)计算得到每个工况的深基础地基承载力,图6所示为考虑 s_u 随深度线性增加时,不确定性分析的地基承载力均值和标准差和对应的确定性分析的地基承载力随非平稳程度变化的情况。表1列出了图6中各不确定性分析及其对应的确定性工况的无量纲承载力。由表1可知,无论不排水剪切强度的均值和标准差随深度变化的程度如何,不确定性分析的结果都小于确定性分析的结果。由图6可知,地基承载力随不排水剪切强度非平稳程度的增加而线性增加,且不确定性分析中承载力随 s_u 非平稳程度增加的幅度小于确定性分析中的承载力增加幅度。这是因为对于不确定性分析中的随机场而言, s_u 具有空间变异性且其空间分布具有随机性,使在相同埋深处的地基中不确定性分析的土体比确定性分析(相同埋深处的 s_u 为确定值)多存在强

度更低的软弱区域,从而有利于产生贯通破坏面,因此随机非均质场地的承载力小于确定性分析场地的承载力,且随机非均质场地地基承载力随 s_u 非平稳程度增加幅度小于确定性均质场地。

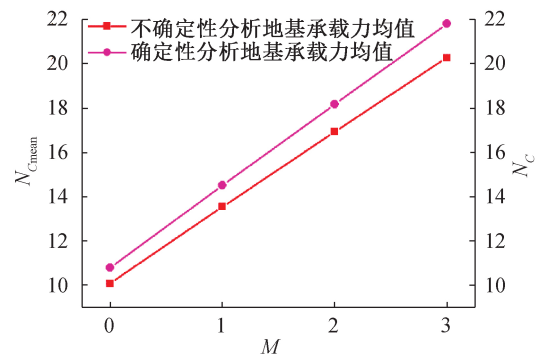


图6 非平稳地基的确定性分析和不确定性分析的地基承载力随非平稳程度变化趋势

Fig.6 Variation of the bearing capacity of deterministic analysis and undeterministic analysis with degree of non-stationary

表 1 不确定性分析的非平稳地基的地基承载力均值 $N_{c,mean}$ 和其对应的确定性分析的地基承载力 N_c

Tab.1 The mean bearing capacity $N_{c,mean}$ of undeterministic analysis and the corresponding deterministic bearing capacity N_c for non-stationary field

| | M_0 | M_1 | M_2 | M_3 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| 确定性分析结果 N_c | 10.77 | 14.50 | 18.16 | 21.79 |
| 不确定性分析结果 $N_{c,mean}$ | 10.08 | 13.53 | 16.91 | 20.26 |

图 7 所示为考虑 s_u 均值和标准差随深度线性增加时,地基承载力的均值和标准差随非平稳程度变化的情况。由图 7 看出,基础埋深为 $2B$ 时,地基承载力均值和标准差都随着 M 值的增加而线性增加。以图 5 中四种工况为例, $M = 0.0, 1.0, 2.0$ 和 3.0 的地基承载力随 s_u 非平稳程度的提高而增加,分别为 $N_c = 9.70, 13.12, 16.48, 29.80$,但是 $M = 1.0, 2.0$ 和 3.0 的破坏面分布却十分接近。这是因为,一旦 s_u 呈现出非平稳性,底部高强度土体的限制使破坏面就很难再向下发展,使非平稳地基的破坏面近似。因此,破坏面形态不再成为决定承载力大小的因素,而破坏面经过处的土体不排水剪切强度大小成为影响承载力大小的主要因素。随着非平稳程度的增加,破坏面经过的地方 s_u 越大,使地基承载力越大。

图 8 给出了不同非平稳程度的地基承载力概率密度函数曲线 (PDF),这四条曲线是通过地基承载力数据进行对数正态分布拟合得到的。通过 χ^2 检验证明了承载力服从对数正态分布,因此对数正态分布能较好地表示承载力的分布特征。由图 9 可知,当不排水抗剪强度的非平稳程度较高时,PDF 曲线更宽,地基承载力分布范围更大,即变异性更大,且地基承载力也更大。图 8 的结果与图 6 和表 1 呼应,印证了上文的结论。

为了研究地基承载力随 M 值增加的趋势与基础埋深的关系,此外还研究了 $4B$ 埋深基础在 $M = 0.0, 1.0, 2.0, 3.0$ 情况下的地基承载力,得到计算结果如图 7。由图 7 可知,同样的,对于 $4B$ 埋深基础而言,地基承载力均值和标准差都随着 M 值的增加而线性增加,但是标准差和均值的增加幅度都比 $2B$ 时大。这是因为 $4B$ 埋深处的 s_u 大小比 $2B$ 埋深处的 s_u 对非平稳程度的增加更加敏感,即非平稳程度增加 ΔM , $4B$ 埋深处的 s_u 均值增量 $\Delta\mu_{su}$ 比 $2B$ 埋深处的 $\Delta\mu_{su}$ 更大,由于 COV 随深度的不变性,标准差的增量 $\Delta\sigma_{su}$ 也遵循此规律,这就使得 $4B$ 埋深基础的承载力均值增量 $\Delta\mu_{qu}$ 及差异性增量 $\Delta\sigma_{qu}$ 更大。因此, $4B$ 埋深基础的地基

承载力均值和标准差随非平稳程度增加的趋势均大于 $2B$ 埋深基础。由图 7 得出以下结论:(1) 地基承载力随着土体不排水抗剪强度的非平稳程度的提高而增加,且基础埋深越大,增长趋势越明显,即对于埋深较深的基础,将不排水抗剪强度的非平稳性提高相同的强度,它带来的承载力的提升效果优于埋深更浅基础的;(2) 地基承载力的差异性随着土体不排水抗剪强度的非平稳程度的提高而增加,且基础埋深越大,增长趋势越明显。

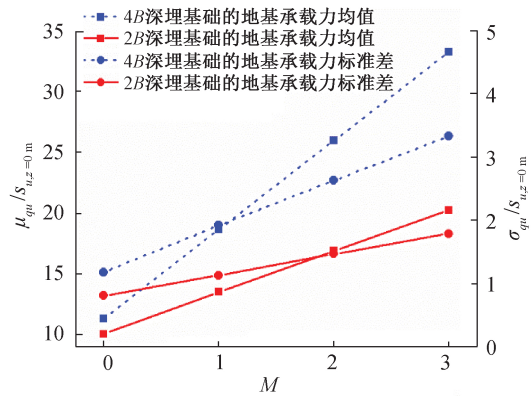


图 7 考虑非平稳随机场的 $2B$ 和 $4B$ 埋深基础的地基承载力均值和标准差随非平稳程度的变化趋势
Fig.7 Variation of mean and standard of bearing capacity for footings buried at $2B$ and $4B$ depth with degree of non-stationary as considering non-stationary random field field

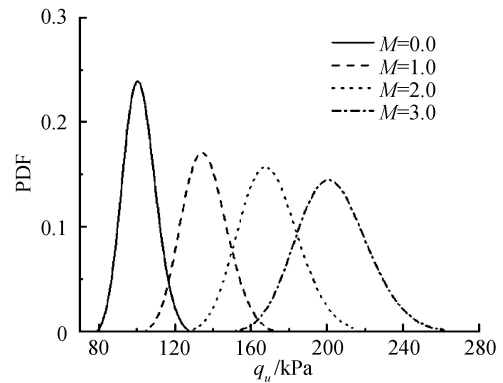


图 8 不同非平稳程度的随机场的地基承载力概率密度函数曲线
Fig.8 Probability distribution function curve of bearing capacity for different degrees of non-stationary random fields

3.3 不同非平稳程度随机场的地基失效概率

土地基的破坏可以通过极限承载力或地基沉降进行判别^[15],本文是通过地基承载力进行判别的。根据 Griffith 等^[16]的研究可知,随机场土地基的破坏可以看作是地基承载力小于对应的确定性分析的地基承载力,即 $q_u/q_{u,det} < 1$ 。然而,将

地基承载力小于确定性分析的地基承载力作为破坏标准过于严苛。事实上,通常通过引入安全系数 FS ,将随机场地基承载力小于 $q_{u,det}/FS$ 作为破坏标准。对于服从对数正态分布的地基承载力而言,地基失效概率,即地基承载力小于 $q_{u,det}/FS$ 的概率的计算公式为:

$$p(q_u < q_{u,det}/FS) = \Phi\left(\frac{\ln(q_{u,det}/FS) - \lambda_{qu}}{\xi_{qu}}\right) \quad (6)$$

式中, Φ 是正态累积分布函数, λ_{qu} 和 ξ_{qu} 分别为地基承载力取对数后的均值和标准差, $q_{u,det}$ 是确定性分析的地基承载力, $M=0.0, 1.0, 2.0$ 和 3.0 对应的确定性分析的地基承载力 $q_{u,det}$ 分别为 107.72、145.01、181.61、217.95 kPa。

图9给出了 s_u 均值和标准差随深度线性增加时,地基极限承载力累计概率分布函数曲线(CDF),由图10及式(5)可知不同的安全系数对应的地基失效概率。当 $FS=1.1$ 时, $M=0.0, M=1.0, M=2.0, M=3.0$ 对应的失效概率分别为 37.5%, 39.4%, 40.9% 和 41.7%; 当安全系数增加至 1.2 时,对应失效概率分别降低至 8.1%, 9.9%, 11.1% 和 11.9%。而当 $FS=0.9$ 时, $M=0.0, 1.0, 2.0, 3.0$ 对应的失效概率分别为 98.5%, 98.3%, 98.1% 和 97.9%。可以看出,考虑不排水抗剪强度均值和标准差随深度线性增加时,在相同的安全系数水平下 ($FS > 1$),地基失效概率随着 s_u 非平稳程度的增加而逐渐增加,说明非平稳程度对地基失效概率有明显的影响。传统的地基稳定设计要求失效概率控制在 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 范围内,当考虑不排水抗剪强度均值和标准差随深度线性增加时,即使对于 $M=3.0$ 这种非平稳程度较高的地基而言,不需要较高的安全系数即可达到地基承载力可靠度要求。如当 $M=3.0$ 时,安全系数为 1.4 时对应的地基失效概率就可达到 1.8×10^{-3} ,符合地基稳定的失效概率控制目标。

为比较不排水抗剪强度随深度线性增加的随机场模型与传统的不排水抗剪强度平稳随机场模型,将平稳随机场的不排水强度均值分别取 $M=1.0, 2.0, 3.0$ 非平稳随机场模型中部的不排水抗剪强度,即 $\mu_s = 15.0$ kPa, $\mu_s = 20.0$ kPa 和 $\mu_s = 25.0$ kPa,蒙特卡罗模拟次数均为 1 000 次,其他参数取值与不排水抗剪强度非平稳随机场相同。通过对比计算结果发现,传统平稳随机场的地基失效概率 $p(q_u < q_{u,det}/FS)$ 与 μ_s 的取值无关,这里的 $q_{u,det}$

为 $\mu_s = 15.0$ kPa, $\mu_s = 20.0$ kPa 和 $\mu_s = 25.0$ kPa 的平稳随机场对应的确定性分析的地基承载力,分别为 161.6、215.4、269.3 kPa。因此在相同的安全系数水平下,不同的非平稳随机场对应的平稳随机场的地基承载力失效概率是相同的。如图10所示,实线表示的是非平稳随机场的地基失效概率,虚线表示的是非平稳随机场对应的平稳随机场的地基失效概率,当安全系数水平相同时 ($FS > 1$),各非平稳随机场的失效概率均大于它们对应的平稳随机场的失效概率,且 s_u 非平稳程度越高,失效概率相差越大。如当 $FS=1.1$ 时, $M=0.0, 1.0, 2.0$ 和 3.0 的地基失效概率分别为 37.5%, 39.4%, 40.9% 和 41.7%,各平稳随机场失效概率与 $M=0.0$ 时的失效概率相同,均等于 37.5%。这表明,深基础地基稳定性设计中使用传统的平稳随机场模型得到的经济效果和稳定性效果与实际情况有偏差。因此,若不考虑不排水抗剪强度均值和标准差随深度线性增加,仅用传统的平稳随机场进行地基承载力计算,会低估地基的失效概率,且这种误差随着非平稳程度的增加而增加。为此,在地基勘探工作中应重视不排水抗剪强度的空间分布特性,在基础设计中不应仅仅将分析范围内的地基土的不排水强度平均化后再用传统的平稳随机场模型计算,这将高估地基的可靠度。

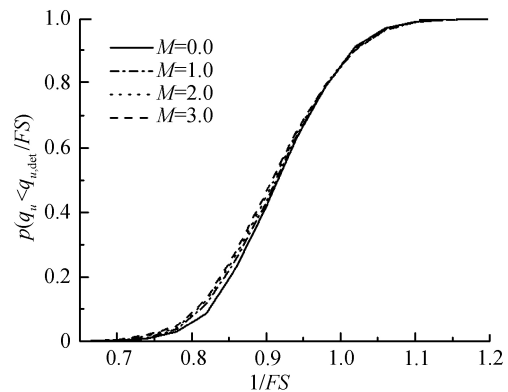


图9 s_u 均值和标准差随深度线性增加时地基极限承载力累计概率分布函数曲线

Fig.9 Cumulative probability of bearing capacity as mean value and standard deviation of s_u linearly increase with depth

4 结论

1) 土体不排水抗剪强度参数的非平稳性对地基承载力有明显影响,地基承载力随非平稳程度的提高而线性增加,且地基承载力的差异性也随非平稳程度的提高而增加。

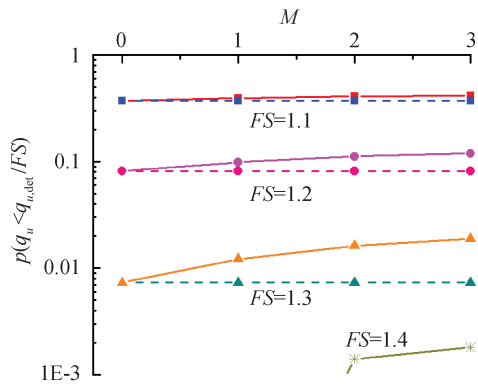


图10 各个安全系数对应的地基失效概率随 s_u 非平稳程度的变化趋势

Fig.10 Variation of the failure probability at different factors of safety with the degree of non-stationary of undrained shear strength

2) 不排水抗剪强度参数的非平稳程度提高地基承载力的效果受基础埋深影响,基础埋深越大,地基承载力随非平稳程度增大而增大的幅度越大,即较强的非平稳性带来的深基础地基承载力提升效果远大于浅基础。

3) 非平稳程度对地基失效概率有影响,在相同的安全系数水平下 ($FS>1$),深基础的地基失效概率随着非平稳程度的提高而逐渐增大,但是都不需要较高的安全系数即可使失效概率控制在目标范围内。

4) 对于深基础而言,各非平稳随机场的地基失效概率均大于它们对应的平稳随机场的地基失效概率 ($FS>1$),即平稳随机场模型会低估具有非平稳性的地基土的失效概率,且非平稳程度越大,估计误差也越大。

参考文献:

[1] 祁小辉,李典庆,周创兵,等.考虑不排水抗剪强度空间变异性的条形基础极限承载力随机分析[J].岩土工程学报,2014,36(06):1095-1105.

[2] 潘健,周森.非均质地基上条形基础沉降的随机有限元分析[J].岩土工程学报,2010,32(S2):196-199.

[3] GRIFFITHS D V, FENTON G A, MANOHARAN N. Undrained Bearing Capacity of Teo-strip Footings on Spatially of Strip Footings[J]. International Journal of Geomechanics, 2006, 6(6): 421-427.

[4] ZHANG Youhu, BRITTA Bienen, MARK J, et al. Undrained Bearing Capacity of Deeply Buried Flat Circular Footings under General Loading [J]. Journal of Geotechnical

and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(3): 385-397.

[5] 蒋水华,李典庆,曹子君,等.考虑参数空间变异性的边坡可靠度及其敏感性分析多重响应面法[J].防灾减灾工程学报,2015,35(05):592-598.

[6] HUANG H W, XIAO L, ZHANG D M, et al. Influence of Spatial Variability of Soil Young's Modulus on Tunnel Convergence in Soft Soils [J]. Engineering Geology, 2017, 228: 357-370.

[7] ASAOKA A, A-GRIVAS D. Spatial Variability of the Undrained Strength of Clays [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division-ASCE, 1982, 108(5): 743-756.

[8] BERGADO D T, PATRON JR B C, YOUYONGWATANA W, et al. Reliability-based Analysis of Embankment on Soft Bangkok Clay [J]. Structural Safety, 1994, 13(4): 247-266.

[9] KANG X, ONYEJEKWE S, GE L, et al. Spatial Variation and Correlation between Undrained Shear Strength and Plasticity Index [C]//Geo-Frontier 2011; Advance in Geotechnical Engineering. Dallas Texas: American Society of Civil Engineers, 2011.

[10] HU Y, RANDOLPH M F, WATSON P G. Bearing Response of Skirted Foundation on Nonhomogeneous Soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(11): 924-935.

[11] WANG C X, CARTER J P. Deep Penetration of Strip and Circular Footings into Layered Clays [J]. International Journal of Geomechanics, 2002, 2(2): 205-232.

[12] WU Yongxin, LI Rui, GAO Yufeng, et al. Simple and Efficient Method to Simulate Homogeneous Multidimensional Non-gaussian Vector Fields by the Spectral Representation Method [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2017, 143(12): 06017016.

[13] LI Jinhui, TIAN Yinghui, MARK Jason Cassidy. Failure Mechanism and Bearing Capacity of Footings Buried at Various Depths in Spatially Random Soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(2): 04014099.

[14] FENTON G A, GRIFFITHS D V. Bearing Capacity Prediction of Spatially Random $c-\phi$ soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(1): 54-65.

[15] ROWE R K, DAVIS E H. The Behavior of Anchor Plates in Clay [J]. Geotechnique, 1982, 32(1): 9-23.

[16] GRIFFITHS D V, FENTON G A. Bearing Capacity of Spatially Random Soil: The Undrained Clay Prandtl Problem Revisited [J]. Geotechnique, 2001, 51(4): 351-359.

(责任编辑 王利君)